

広域海浜流の観測と定式化

馬場康之・加藤 茂・木原直人・山下隆男

要 旨

冬季日本海沿岸における現地観測より、沿岸域の広範囲にわたり海上風と波浪の影響を受けた広域海浜流動場の形成が確認されており、沿岸域の流動場および広域漂砂系を考える上において、広域海浜流動場の特性を把握することは重要である。本報では、上越・大潟海岸の広範囲において実施された現地観測結果から荒天時に発達する流動場の状況を明らかにするとともに、広域海浜流の沿岸方向流速の岸沖分布についての定式化を行ったものである。

キーワード：広域海浜流，吹送流，戻り流れ

1. はじめに

沿岸域の環境保全，管理を行う上で，沿岸域を取り巻く広域の流動場，漂砂系を把握することの重要性はいうまでもなく，各地において現地観測が精力的に行われている。沿岸海域で広範囲に形成される流れ（広域海浜流）は，その生成機構において海上風への依存性が強く，特に強風・高波浪が来襲する荒天時には，沿岸方向に卓越した流動場を形成することが確認されている。この流動場は，広域における物質輸送，漂砂の主外力となることが予想され，その流動特性の把握は，漂砂特性のみならず，沿岸環境の予測，海岸管理技術の進展においても重要な位置を占める。本報は，強風・高波浪の来襲時に，沿岸域の広い範囲に発生する広域海浜流動場の現地観測結果と，それに基づいて広

域海浜流動場の沿岸方向流速分布の定式化を試みたものである。

2. 広域海浜流動場の現地観測

沿岸海域を対象とした現地観測は，近年の計測機器および技術の進展に伴い，数多く実施されるようになり，現地での現象の理解を深める上で貴重となる観測結果をもたらしている。ここで対象とする現地観測は，1998年12月から1999年3月にかけて，新潟県上越・大潟海岸周辺において行われた現地観測であり，その概要については馬場ら（2000）を参照されたい。観測範囲は，沿岸方向に約10km，岸沖方向に約3kmにおよぶ範囲（Fig. 1）であり，碎波帯付近から水深30mにおよぶ広い領域を対象としている。

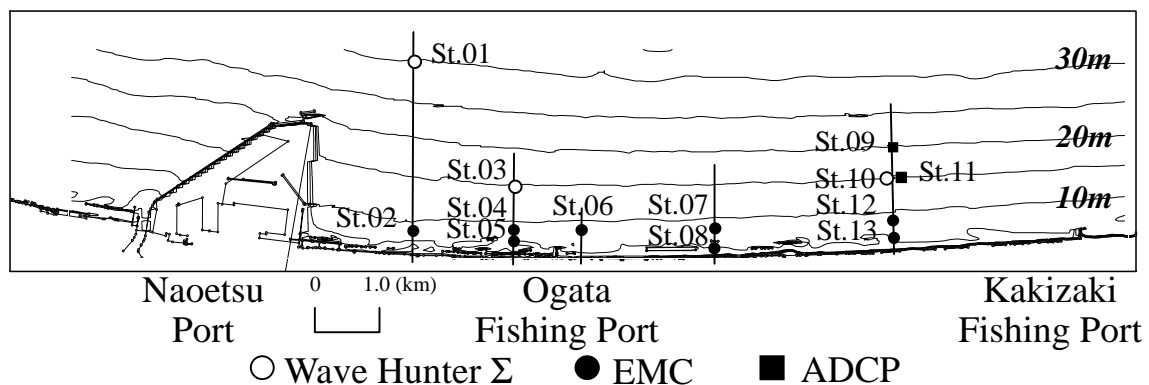


Fig.1 Location of observational equipments

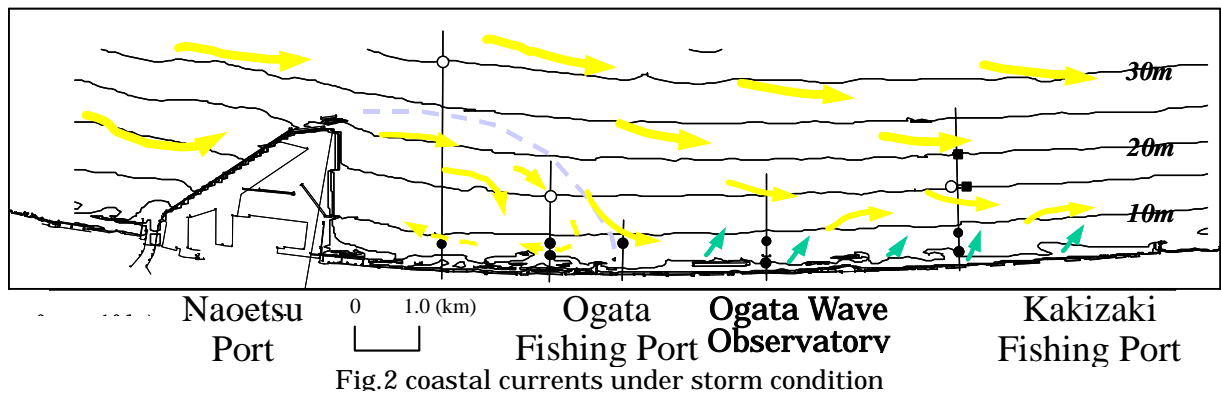


Fig.2 coastal currents under storm condition

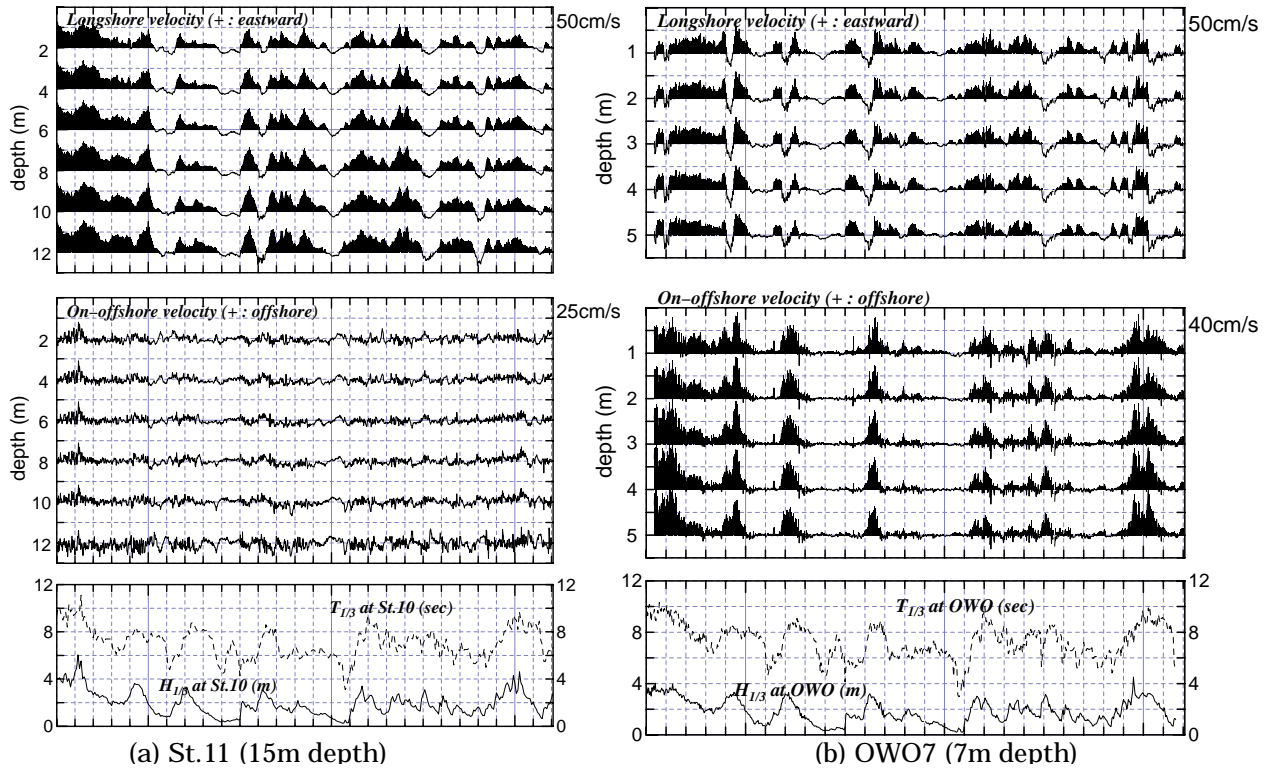


Fig.3 Time variations of longshore and cross-shore velocity, $H_{1/3}$, $T_{1/3}$

観測結果のうち、海底面に設置された流速計一体型水位計を用いた波浪・底面流況観測（全11点）の結果を基に得られた流動場の概況が Fig.2 である。この図は、主に強風・高波浪が来襲する荒天時における流動場を表したものであり、風と波を成因として、沿岸域の広い範囲に形成される流動場を広域海浜流としている。Fig.2 より、沿岸方向、岸沖方向について次のような特徴が見て取れる。

沿岸方向については、岸に沿う方向（北東方向）の流れ場が卓越している様子が認められる。また、沿岸の構造物の背後では、後流域が形成されるなど、異なる流動特性が見られるものの、荒天時には沿岸に沿った強い流動場の形成が確認できる。この流動場は、冬季北西季節風の沿岸方向成分と非常に高い相関を示すことがわかっており、海上風の影響を受けて、広範囲

に強い流動場が発生していることがわかる。また、この流動場の流速は、従来得られている吹送流に関するバルク公式（吹送流速が風速の2乗に比例する）より得られる流速よりも大きく、荒天時の吹送流速の算定には、波浪の影響を考慮する必要のあることも指摘されている。

岸沖方向に関しては、水深の大きな領域においては顕著な流動は確認されない反面、岸に近い領域では、沖向きの流れが発生している。この沖向きの流れは、高波浪の来襲に伴う undertow であると考えられ、その流速は波高および岸向きの流速と強い相関を持つ。岸沖方向の流速については、岸に近い（砕波体内）領域では沖向きが卓越するのに対して、水深 15~20m 付近の領域では、微弱ながら岸向きが卓越する傾向を示す。このことは、岸から沖に向かうにつれて、岸沖方

向流速の向きが変わることを表しており、この変化点の位置は、漂砂系を把握する上でも重要となる。

次に、ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) により計測された流速の鉛直分布の計測結果を示す。観測地点は、Fig.1 中に示されている 2 地点 (St. 9, St.11) および京都大学防災研究所大湊波浪観測所 (Ogata Wave Observatory) 観測棧橋の先端付近 (水深 7m : OWO7) と中間付近 (水深 5m : OWO5) の計 4 地点である。Fig.3 は、St.11 (水深 15m) と OWO7 (水深 7m) において計測された流速 (沿岸・岸沖方向) および有義波高・有義波周期の時系列である。

沿岸方向流速は、いずれの測点においても、高波浪の来襲する荒天時において大きな流速が出現しており、荒天時と高流速の対応は、計測点の水深にはほとんど関係がない。また、各測点においても、ほぼ鉛直に一樣な流速の変化をしていることから、沿岸方向には、鉛直方向に発達した広範囲にわたる流動場が形成されていることがわかる。これらの流速変動は海上風の変動に対応していることが確認されており、海上風の影響を受けた吹送流場として発達していること、および沿岸方向の流動に対する海上風の寄与の大きさを示している。

一方、岸沖方向の流速については、水深の大小による差が明確に見られる。すなわち、水深の大きな計測点 (水深 15m) における流速は非常に小さく、高波浪の来襲する荒天時であっても、ほとんど変化することもない。逆に水深の小さな測点 (水深 7m) においては、40cm/s にも達する強い沖向きの流れが発生しており、しかも水深方向に変化が少ないことから、表層付近を除く領域において沖向きの流れが発生していると考えられる。この計測点は、荒天時には砕波帯内に位置すると考えられ、この地点における流動は、波浪の影響による岸沖方向の流動と、海上風の影響を受けた沿岸方向の流動が共存する形となっている。

Fig.4 は、ADCP による流速計測結果を比較したものである。なお、この図における流速値は水深方向に平均した値である。この図から、沿岸方向流速に関しては、計測点を問わず荒天時に強い流動場が形成されていること、また岸沖方向流速については、水深の大小により沖向き流れの発生の有無がはっきりと分かれることが確認できる。図中丸で囲った部分は、沿岸方向の流速場が発達し、水深方向にほぼ一樣の流速分布を形成している時間帯である。この部分を拡大したものが Fig.5 であり、この期間は比較的強い海上風の連吹が 2 度起きていることがわかる (図中矢印)。1 回目は 11m/s 程度の風速 (沿岸方向成分) が約 7 時間、2 回目は 12m/s 程度の風速が約 6 時間継続している。この 2 回の強風時に対応して、沿岸方向流速が発達し

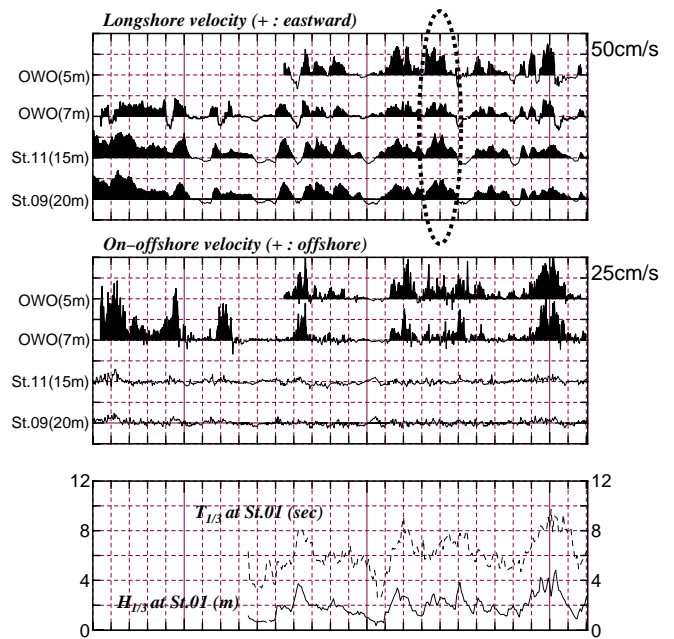


Fig.4 Depth averaged velocity components, $H_{1/3}$ and $T_{1/3}$

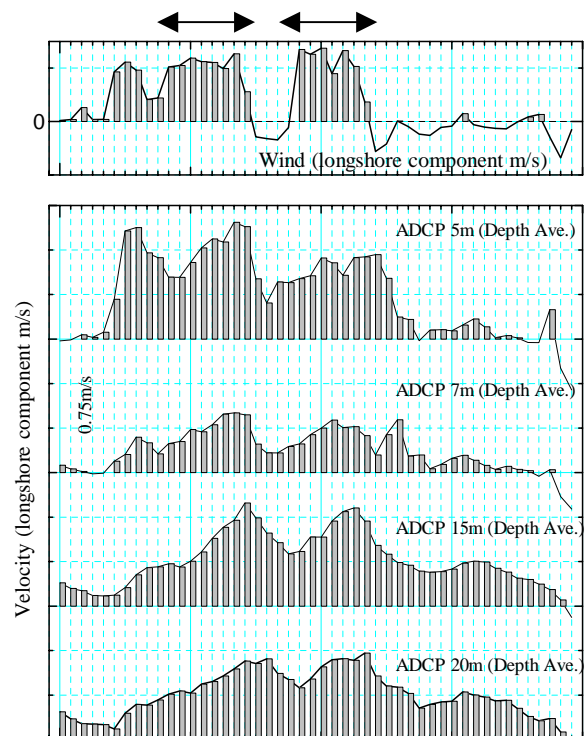


Fig.5 Longshore components of Depth averaged velocity

ている様子が確認できるが、流速の変化は測点の位置により少し違いが見られる。砕波帯よりも沖側に位置する測点 (水深 15m & 20m) では、強風の連続する期間中は流速が増加、風が止むと流速が減少する傾向を示す。荒天時に砕波帯内に位置する測点 (水深 5m & 7m) においても同様の傾向は見られるものの、同程度

の強風が連続しているにもかかわらず、発生する流速値に差が生じている。これは、2回の強風時における波向の影響を受けた結果であり、汀線に直行する波向が卓越する場合よりも、わずかながらでも汀線に対して角度を持つ（流動場の上流側から入射する方向）場合に、沿岸方向流速が大きくなる傾向を示している。このように、砕波体内においても沿岸方向流速は海上風の影響を強く受けている一方で、波浪の影響にも左右される結果となっており、沿岸方向の流動場に関しても、波の影響を考慮する必要がある。

3. 広域海浜流の流速分布の定式化

ここでは、Fig.5のように沿岸域の広範囲にわたって流動場が発達した状況において、沿岸方向流速の岸沖方向分布について検討する。先に述べたように、荒天時に発達する広域海浜流場に関する解析を行う上においては、海上風の影響のみならず、岸に近い領域においては、波浪の影響も考慮する必要があることが指摘されている。以下では、発達した広域海浜流場が鉛直方向にほぼ一様であることをふまえて、水平2次元の解析を行う。

沿岸方向に x 軸、岸沖方向に y 軸をとり、鉛直平均された流動場の基礎式は式(1)のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} &= -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} &= -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho h} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} \quad (1) \end{aligned}$$

流動場が十分に発達し、定常状態を仮定すると、式(1)は式(2)となり、沿岸方向の流動場は、海面と海底におけるせん断力の釣り合いにより表現されることになる。

$$0 = \tau_x - \tau_{bx} \quad (2)$$

$$0 = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho h}$$

海面に作用するせん断力については、海上風および波浪の影響を考慮するため、式(3)のように、海上風によるせん断力と白波砕波によるせん断力の和とした。なお、白波せん断力は、波浪推算モデルで用いられる白波砕波によるエネルギー損失項を参考に、波浪エネルギーフラックスに比例する形で与えている。

$$\begin{aligned} \tau_x &= \tau_{wind} + \tau_{breaker} \\ &= \rho_a C_D W_x^2 + \rho A B g H \sin \alpha \quad (3) \end{aligned}$$

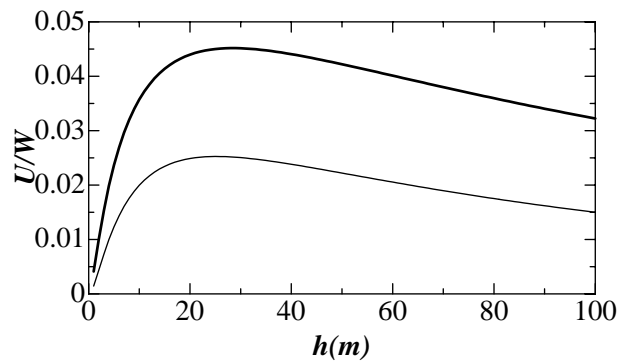


Fig.6 Cross-shore distribution of longshore velocity obtained by a numerical simulation

$$\text{ここに } A = \frac{1}{8g} C_{dis} H_0 \omega^2 \frac{K_s}{\tanh kh}, \quad B = \frac{\lambda}{\lambda_0}$$

(: 波形勾配)

海底面におけるせん断力に関しては、従来より底面における摩擦係数と流速の2乗に比例する形のパルク公式がよく用いられるが、ここでは、準3次元数値モデルより得られた沿岸方向流速の断面平均値の分布より海底摩擦係数の分布形を推定した。Fig.6は、数値モデルにより得られた沿岸方向流速の岸沖分布であり、外力としては一定風速のみを与え、海面抵抗係数も一定値を与えている。この流速分布は式(4)に示す対数正規分布式により近似することができる。

$$U/W = \frac{c}{\sqrt{2\pi ah}} \exp\left[-\frac{(\ln h - b)^2}{2a^2}\right] \quad (4)$$

$$a = 1.35, \quad b = 5.05, \quad c = 5.36$$

一方、海面と海底面でのせん断力の釣り合いの式より、流速・風速比が式(5)のように得られることから、式(4)、(5)より、海底摩擦係数が水深の関数として式(6)のように得られる。

$$U/W = \sqrt{\frac{\rho_a C_D}{\rho f}} \quad (5)$$

$$f(h) = \frac{2\pi\rho_a C_D a^2}{\rho c^2} h^2 \exp\left[\frac{(\ln h - b)^2}{a^2}\right] \quad (6)$$

以上の式より、式(2)のせん断力の釣り合いによる水平2次元の解析から、沿岸方向流速の岸沖分布が得られる。さらに、波浪による沿岸方向流速への影響を考慮するために、水深に規定される砕波で発生するLonguet-Higgins(1970)の沿岸流の理論解Ubrを足し合わせることで、広域海浜流の沿岸方向流速の岸沖分布を次式のように得る。

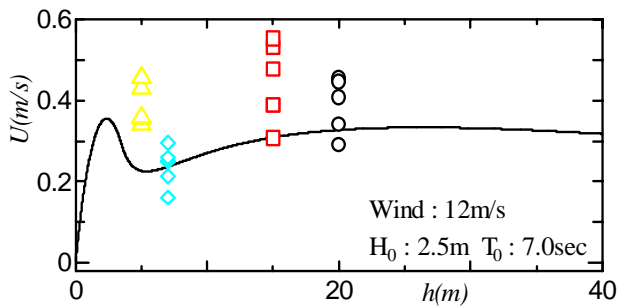


Fig.7 Comparison of observed and calculated cross-shore distribution of longshore velocity
Dots : observed data
Line : calculated data

$$U = \sqrt{\frac{\rho_a C_D W_x^2 + \rho A B g H \sin \theta}{\rho f(h)}} + U_{br}(y/y_b) \cdot u_0 \quad (7)$$

式(7)に対し、現地観測結果に対応する外力条件(底面勾配: 1/100, 風速, 波高, 波向は一定値)を与えて、流速分布を計算した結果が、Fig.7である。図より、全体的に観測値は、計算値と同等もしくは上回る傾向を示している。この計算値よりも大きな流速値は、強風の吹き出しから数時間以上経過した流速値であり、吹き出し直後の流速値は、計算値と比較的近い値となっている。また、最も岸側の計算値が、観測値よりも大きく下回る結果となっているが、これは砕波点が現地ではより沖側であることなど、現地での現象を十分に再現できていない部分の影響によると考えられる。

Fig.8は、流速の時系列と計算結果を、水深の大きな計測点(砕波帯よりも沖側)について比較したものである。今回の水平2次元解析より得られた流速値は、強風の吹き始めに対応する流速値に相当しており、風と波が共存する場における流速が良好に推定できたことを示している。しかしながら、強風の連吹に伴う流速値の増加や砕波帯内部での流速値については十分に表現し切れていない。流速値の増大に関しては、今回の水平2次元解析が、定常状態を仮定しているため、基本的に考慮できない部分ではあるが、今後の検討においては、強風の連吹により流速場が強化される現象についても検討の余地を残している。

4. おわりに

本報では、冬季日本海沿岸における強風・高波浪来襲時の流動場の現地観測結果に関する検討と、荒天時に沿岸域に形成される広域海浜流場に関する流速分布の定式化を行った。現地観測結果より、荒天時に発達する流動場は、沿岸方向には海上風の影響を強く受け、岸沖方向には、高波浪の来襲と対応して強い沖向き流

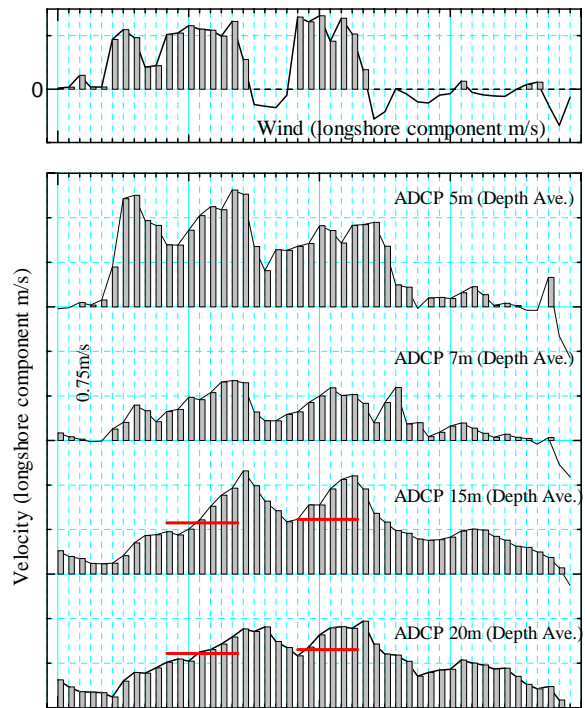


Fig.8 Longshore components of Depth averaged velocity and calculated data(solid bars)

れが確認された。この強い沖向き流れの発生は、荒天時の砕波帯内と思われる領域に限定されており、岸沖漂砂のメカニズムを把握するための重要な外力である。また同時に沿岸方向には、鉛直方向にほぼ一様な流動場が形成されており、先の岸沖方向の流動と併せて、その流動機構の解明は沿岸漂砂系を考える上の基礎となる部分である。

広域海浜流の沿岸方向流速の岸沖分布を対象とした定式化では、強風が連続して、鉛直方向にほぼ一様な流動場が形成された時期を選び、水平2次元・定常としての解析を行った。前提条件より、流れの基礎式はせん断力の釣り合い式に簡略化されるが、ここでは海面では、海上風と波浪の影響を考慮した形でのせん断力を与え、海底面に対しては水深により応じて変化する摩擦係数を用いて、沿岸方向流速の岸沖分布を求めた。計算結果と観測結果の比較では、強風の吹き始めに相当する流速値が計算により算定され、荒天時の流速を良好に推算することができることから、広域における漂砂系を評価する上での基本的な流動場を推測することができる。しかしながら、強風が連吹することにより、観測結果においては流速が徐々に増加しており、気象・海象条件が大きく変化しない中でも、強風・高波浪が継続する状況では、流動場が強化される機構が存在しており、今後の検討課題である。

参考文献

馬場康之・今本博健・山下隆男・加藤 茂・内山 清
(2000): 冬季日本海の広域海浜流特性について -
1999 年上越・大潟海岸での合同観測結果より - ,

京都大学防災研究所年報, 第 43 巻, pp.433-442.
Longuet-Higgins, M.S.(1970): Longshore currents
generated by obliquely incident sea waves, 1 & 2, Jour.
Geophys. Res., Vol.75, No.33, pp.6778--6801.

**Field observation of coastal currents under storm condition
and empirical formulation of velocity distribution of the currents**

Yasuyuki BABA, Shigeru KATO, Naoto KIHARA and Takao YAMASHITA

Synopsis

In the Central Japan Sea, winter monsoon winds develop high waves together with strong wind-induced currents in the wide area of nearshore zone. The currents are the dominant external force of beach changes and coastal environment. Field observation has carried out in the wide area of Joetsu-Ogata coast from December 1998 to March 1999, and the structure of coastal current fields are investigated. It is obvious from the results that strong offshore-going currents are in the surf zone, such as undertow, as well as longshore currents in the wide area of nearshore region by wind. Additionally, a empirical equation of cross-shore velocity distribution of longshore currents is shown, and it gives velocities of longshore currents at early stages of storm conditions. stormy condition.

Keywords : coastal currents, wind-induced currents, undertow